

可聴帯域振幅変調

高橋 徹[†], 山田 耕嗣^{††}

Amplitude Modulation in Audible Frequency Bands

TAKAHASHI Toru[†], YAMADA Koji^{††}

概要

我々は、可聴周波数帯域での振幅変調に基づく信号伝送システムの設計と実装について述べる。典型的な振幅変調に基づく信号伝送システムでは、信号は、非常に高い周波数によって変調される。我々のシステムは、2から20000Hzの間の可聴信号のような非常に低い周波数を用いる。我々は、可聴帯域で信号を伝送可能であることを実験で示した。

キーワード：振幅変調, 可聴帯域周波数

Abstract

We describe a design and an implementation of a signal transmission system based on the amplitude modulation in audible frequency bands. In conventional signal transmission system based on the amplitude modulation, signal is modulated by very high frequency. Our system uses very low frequency, such as audible signal between 2 and 20000Hz. We experimentally show that it is possible to transmit based on the audible bands.

Key Words : Amplitude Modulation, Audible Frequency Bands

[†]大阪産業大学 デザイン工学部 情報システム学科准教授

^{††}大阪産業大学 デザイン工学部 情報システム学科特任講師

草稿提出日 1月24日

最終原稿提出日 1月24日

1 はじめに

本稿では、振幅変調を可聴周波数帯域で実現する方法について述べる。我々は、アクティブラーニングの実現手段として、体感型教材が重要であると考えている^{1, 2, 3, 4)}。そのままでは体感できない教育内容を体感可能な形式に変換した教材を提供する。本教材により、学習者はその場で試行錯誤可能で、思考のフィードバックをリアルタイムに体験できる。我々は、このフィードバックが学習者にポジティブな作用を及ぼすと考えている。この仮説を検証する目的で、信号処理技術の一つである振幅変調を体感可能な形式に変換する方法を開発した^{5, 6)}。

数式で表される振幅変調と復調を音として聴覚で確認可能な表現に変換する。典型的な振幅変調通信は、可聴音を可聴領域よりはるかに高い周波数（例えばAMラジオ放送では1000kHz前後）で変調する。我々は可聴帯域2~20000Hzで振幅変調する方法を示し、可聴帯域で振幅変調可能であることを信号の歪を評価することで示す。

2 振幅変調

振幅変調（Amplitude Modulation）に基づく通信は、AM通信と呼ばれている。AM通信は、信号の送受信時の信号表現にAM変調信号が用いられる。典型的なAM通信には、AMラジオ放送があり、搬送波には中波や短波が用いられてきた。また、AM通信は、アナログ信号処理で実現されることが多い。

AM通信の変調と復調を可聴帯域で実現し、体感教材として実現する。可聴信号を搬送波として用いると、変調信号もまた可聴信号となり変調・復調の入出力は全て可聴信号となり体感可能な実験教材となる。これらの処理をデジタル信号処理として実現し、教材をソフトウェアとして提供することを目的とする。パソコン、スマートホン、タブレット端末などの普及した機器で動作可能であり、教材を普及させるのが容易であるという特徴がある。この様な理由から、振幅変調教材をデジタル信号処理として実現する。

図1に本稿で扱う通信系を示す。可聴信号 $s(n)$ を送受信する時、 $s(n)$ を変調し $y(n)$ を伝送する。 n は離散時間を表すインデックスである。受信側は、変調信号に雑音の影響を受けた $\hat{y}(n)$ を受け取り、復調して $s(n)$ の推定値 $\hat{s}(n)$ を得る。始めに通信系の流れに沿って、AM信号の変調と復調を概説し、続いて可聴帯域の

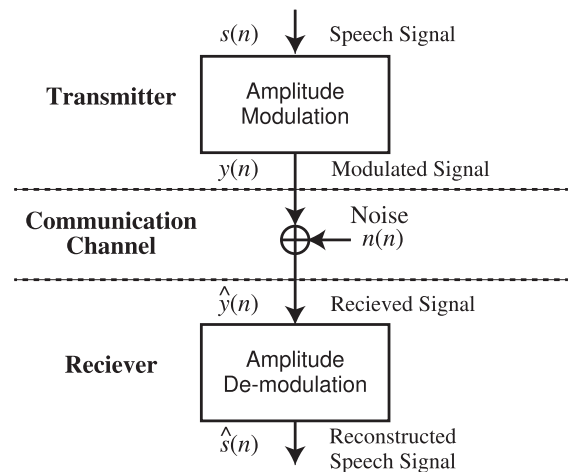


図1：通信系

AM変調と復調について述べる。

2.1 変調

信号 $s(n)$ の変調を考える。ただし、 $s(n)$ は、任意の n について $-1 \leq s(n) \leq 1$ を満たすとする。この時、搬送波を $f(n)$ とすると、変調信号 $y(n)$ は、

$$y(n) = (1 + ms(n)) f(n) \quad (1)$$

と表せる^{7,8)}。 m を変調度と呼び $m = 1/A_c$ で、 $A_c > 0$ である。搬送波 $f(n)$ の周波数を f_c (Hz)、振幅 A_c とすると、搬送波は、

$$f(n) = A_c \cos\left(2\pi n \frac{f_c}{f_s}\right) \quad (2)$$

と表せる。ただし、サンプリング周波数を f_s とする。式 (1) が、変調処理である。

図2に被変調信号を示す。2 Hzのsin波形である。この波形を10kHzの搬送で変調した結果を図3に示す。搬送波形の正領域の包絡に2 Hzのsin波形が写し取られていることを確認できる。ただし、振幅が半分になっている。つまり、AM通信では、振幅の絶対値を保存されない。同様に負領域の包絡にも2 Hzの $-\sin$ 波形が写し取られている。復調では、これら正または負領域の包絡を取り出す処理であると考えると直感的に理解しやすい。

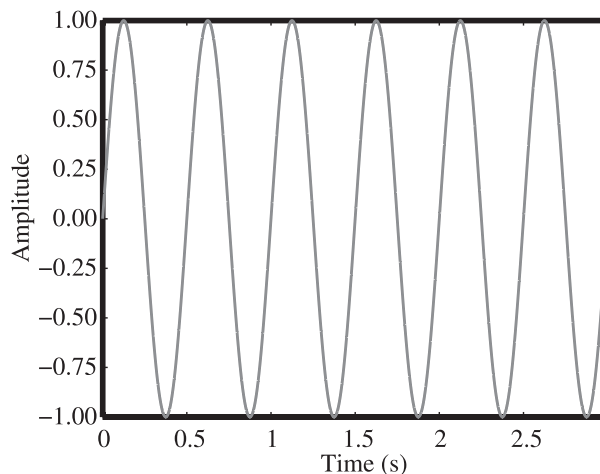


図2：被変調信号の波形

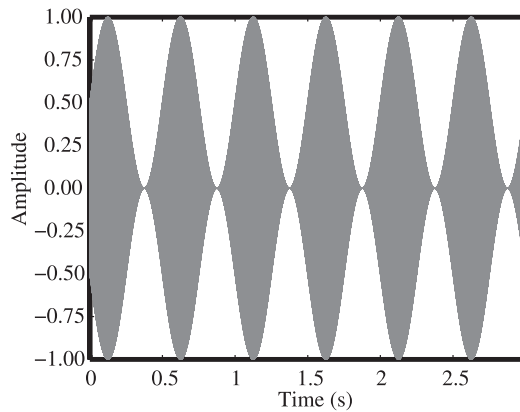


図3：AM変調の波形

2.2 復調

受信信号波形 $\hat{y}(n)$ を同期検波により復調する方法について述べる。同期検波は、包絡線検波の様な非同期検波に比べて、高精度に信号を復調できる。同期検波処理は、受信信号と同期検波信号の積で定義できる。同期検波波形を $p(n)$ とすると、同期検波処理は

$$p(n) = \hat{y}(n) f'(n) \quad (3)$$

と表せる^{7,8)}。同期検波信号 $f'(n)$ は、送信側の搬送波と同一周波数 f_c (Hz) に基づき生成する。

$$f'(n) = \cos\left(2\pi n \frac{f_c}{f_s} + \phi_c\right) \quad (4)$$

と表される。送信側の搬送波と位相を完全に一致させることは困難であることから位相差

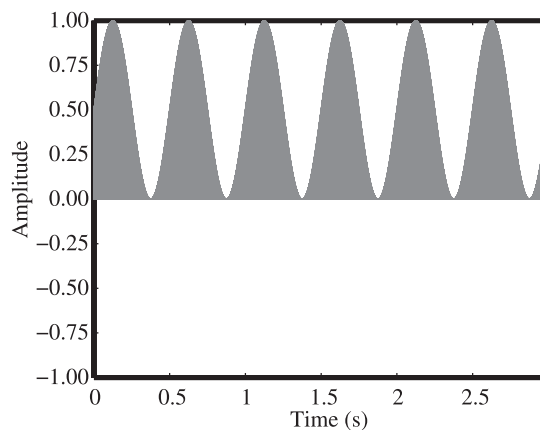


図4：同期検波処理後の波形

ϕ_c radianが導入されている。同期検波処理後の信号を図4に示す。

$p(n)$ をローパスフィルタで不要な成分を除去し、時間平均値を0に正規化することで復調信号 $\hat{s}(n)$ が得られる。 $p(n)$ をローパスフィルタ処理した結果を図5に示す。搬送波の周波数は、カットオフ周波数より高いため、変調波形が取り除かれる。この様にローパスフィルタ処理によって、正領域の包絡を取り出すことができる。更に時間平均値を0に正規化した結果(復調波形)を図6に示す。この様に、送信波形である2 Hzのsin波形を復調できる。

設計したローパスフィルタ (LPF: Low Pass Filter) を FIR (Finite Impulse Response) フィルタ⁹⁾は、92次の線形位相フィルタで、カットオフ周波数4 kHzである。図7, 8にフィルタの時間波形と振幅周波数特性を示す。

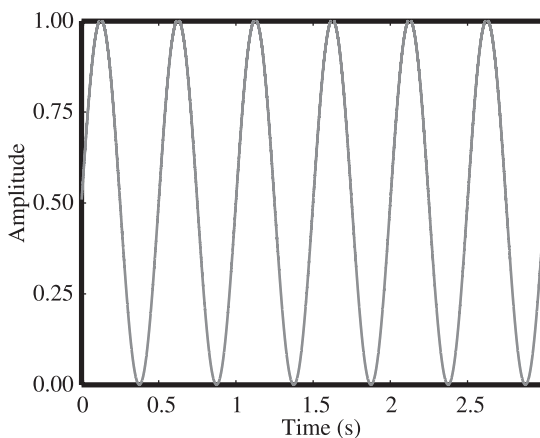


図5：ローパスフィルタ処理後の波形

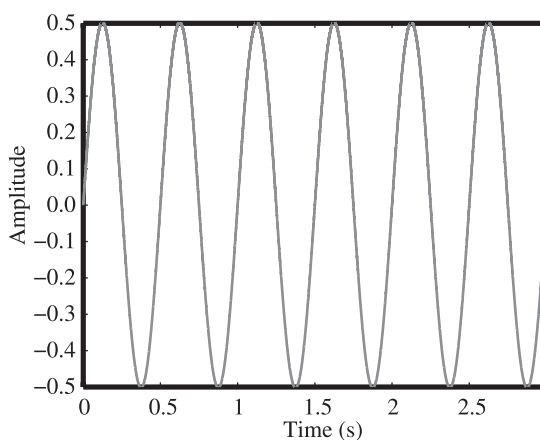


図6：復調波形

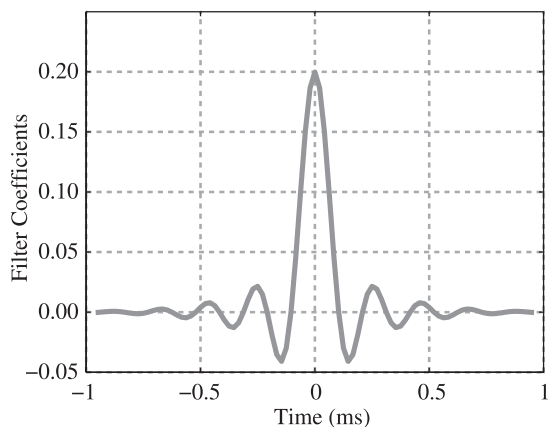


図7：92次 FIRフィルタ（時間波形）

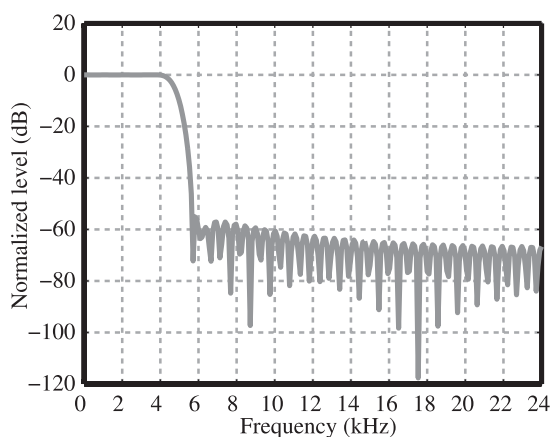


図8：92次 FIRフィルタ（振幅周波数特性）

設計したFIRフィルタの係数を $b(0), b(1), \dots, b(92)$ とすると、復調波形 $\hat{s}(n)$ は、

$$\hat{s}(n) = \sum_{m=0}^{92} b(m) p(n-m) \quad (5)$$

である。 $n = 0, \dots, N-1$ であり、 N は受信信号のサンプル数である。復調処理は、式(3)、(4)、(5)で実現できる。

3 可聴帯域の振幅信号

通常のAM通信は、中波帯域（波長100～1000m程度）で使用されている。また、キャリア周波数は、同時に複数使用されることが前提で、中波帯域の周波数を用いるのが一般である。AMラジオでは、音楽の伝送に耐える30～40kHz程度の帯域が確保されている。ここでは、音

声帯域を使ったAM通信を実現するために必要最小限の帯域（ここでは8kHzの帯域）で通信をデジタル信号処理系で実現するための設計を示す。

3.1 通信可能な信号帯域

$s(n)$ が、上限周波数 $b(\text{Hz})$ に帯域制限された信号の時、 $s(n)$ を構成する信号の最高周波数は $b(\text{Hz})$ 未満である。搬送波の周波数 f_c が、 b より十分大きい時、振幅変調によって信号 $s(n)$ を歪みなく伝送することが可能である。 b に対して十分大きな搬送波の周波数を使用できない時歪みを伴う。サンプリング周波数 f_s の下で f_c はナイキスト周波数未満である必要がある。つまり、

$$b \ll f_c < f_s / 2 \quad (6)$$

を満たすことで信号 $s(n)$ を歪み無く伝送できる。変調後の波形には $f_c - b$ から $f_c + b$ の周波数成分を含む。従って

$$0 < f_c - b, \quad (7)$$

$$f_c + b < f_s / 2 \quad (8)$$

も満たす必要がある。以上の条件を満たす可聴帯域AM信号の搬送波の周波数を設計する。一般的なパソコンで音声の録音と再生がサポートされているサンプリング周波数 $f_s = 48000$ について設計する。

式(6)を満たす様に、 $f_c = 10000$ とすると、 $f_c < f_s / 2 = 24000$ を満たす。次に、 $b = 4000$ とすると、 $b < f_c$ を満たす。これは、式(7)の $0 < f_c - b = 6000$ および式(8)の $f_c + b = 14000 < f_s / 2 = 24000$ を満たす。 $b < f_c < f_s / 2$ は満たしているが、 $b \ll f_c$ であるかどうかを考える必要がある。 $2.5b = f_c$ であり、 b に対して十分大きな f_c であるとは言い難い。そこで実験によって転送後の信号がどの程度再現できるか確認する。

搬送波の周波数が高いほど、送信信号の帯域 b を広げることが可能である。送信帯域は増加するが、搬送波が可聴域を越える信号となり体感不可能となる。健全な成人の可聴領域の上限以下の10kHzで設計する¹⁰⁾。これらの条件から送信信号の帯域 b は4kHzとなった。この条件下では、4kHzの低域通過フィルタを通した音声信号を伝送する実験が可能である。日本語音声の母音の特徴はホルマントと呼ばれるスペクトルのピークで表される。低い周波数から第1ホルマント、第2ホルマントと呼ばれる。日本語の第1、第2ホルマントは、3.4kHz以下で表現可能である¹¹⁾ ことと、また、日本語の5母音は、第1、第2ホルマントで判別可能であることから、4kHzまでの情報を保存できれば、日本語の明瞭度を保った伝送品質を満たした

通信路を設計できる。また、本設計では電話帯域300～3400Hzよりも広い帯域の設計であることから、明瞭度を保った音声伝送が可能であることが直感的にも理解できる。

3.2 変復調の確認

変復調の確認のために、音声データベースJNAS¹²⁾中の音声を伝送する実験を行い評価する。JNASは、16kHzでサンプリングされた音声信号が記録されている。これら音声信号から4kHz以上の信号を除去するために、サンプリングレートを変換し8kHzにダウンサンプリングする。続いて、変復調系で用いる48kHzサンプリングにアップサンプリングする。この一連の処理により、音声は、48kHzのサンプリング周波数で表現されながらも、4kHz未満の成分を含む帯域制限された音声信号表現に変換される。以後、この音声データを用いて実験を行う。

表1の条件で、音声信号を可聴帯域AM通信で伝送する。図9左に、音声信号の波形を示す。この信号は、音声コーパスJNASの女性話者による音素バランス文である。図9右にスペクトログラムを示す。エネルギーが4kHz以下に制限された信号であることを確認できる。

表1：分析条件

サンプリング周波数	48 (kHz)
搬送波周波数	10 (kHz)
A	1.0
A_c	0.5
LPFのFIR次数	92
入力信号 (被変調波)	音声 (0～4kHz)
出力信号 (復調波形)	音声 (0～4kHz)

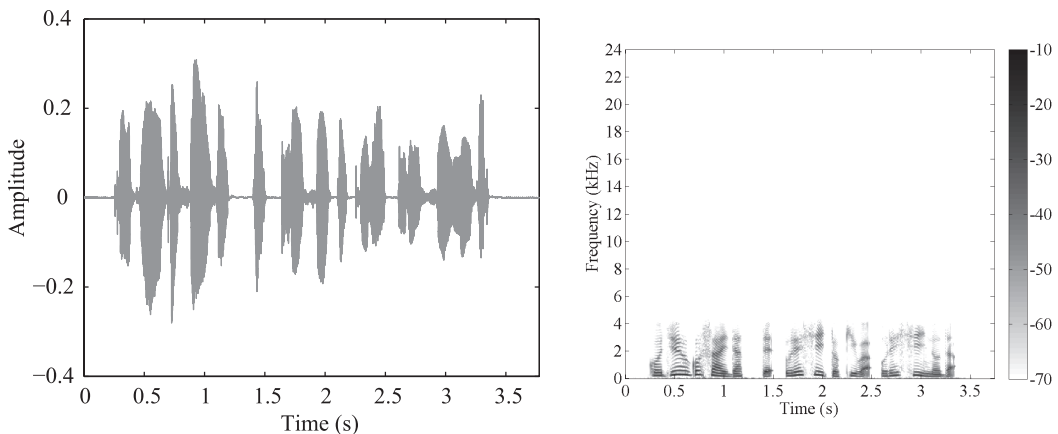


図9：音源の波形とスペクトログラム

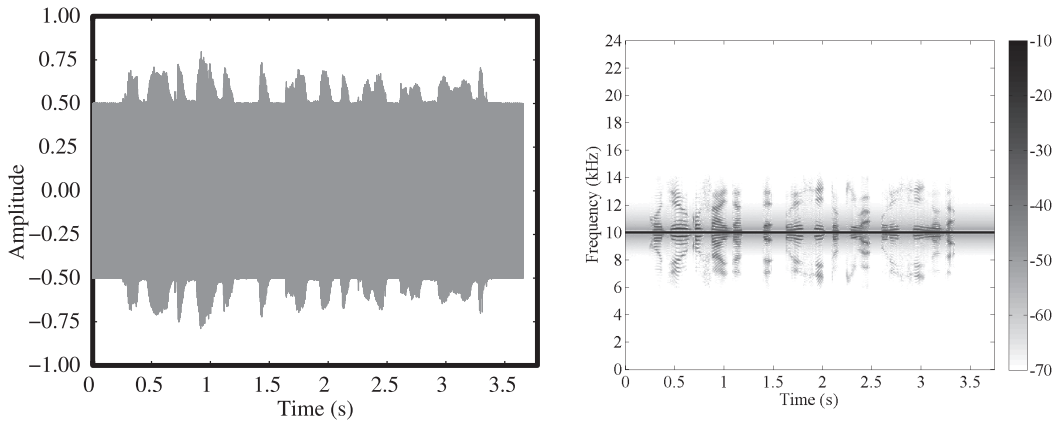


図10：AM変調信号の波形とスペクトログラム

図9を変調すると、図10の様に変調信号が得られる。搬送波を10kHzにしたため、エネルギーの中心は10kHzに表れている。また、送信波形が0～4kHzの帯域の信号であることから、10kHzを中心に上下4kHzの幅（6k～14kHzの帯域）で変調信号のエネルギーが分布していることも確認できる。

図11に復調信号を示す。図9と比較すると、サンプルレベルで一致しないが、概形は保存されている。この例で、送信信号 $s(n)$ に対する受信信号 $\hat{s}(n)$ の歪み

$$10 \log_{10} \frac{\sum_n s^2(n)}{\sum_n (s(n) - \hat{s}(n))^2} \quad (9)$$

は、15.7 (dB) であった。 $b \ll f_c$ を $2.5b \leq f$ と近似しても16 (dB) 程度の歪みに留めることが可能であることを確認できた。

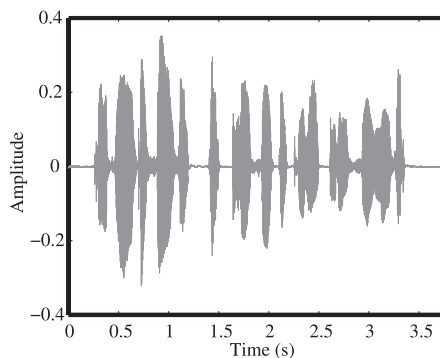


図11：AM復調信号 $\hat{s}(n)$

4 まとめ

振幅変調を体感可能な形式に変換する方法として、被変調信号、搬送波、変調信号、復調信号の全ての信号が可聴帯域に入る振幅変調方法について述べた。典型的な振幅変調通信では、可聴音を可聴領域よりはるかに高い周波数（例えばAMラジオ放送では1000kHz前後）で変調する。我々は可聴帯域2～20000Hzで変調し、振幅変調による通信が可能であることを実験的に示した。伝送信号の音声は、明瞭度が保たれていることを確認した。これにより、聴くという形で体感できるAM通信教材の作成が可能になった。

今後、アクティブラーニングの実現手段として、体感型教材が重要であるという仮説を検証するために開発した教材を使っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 福井, 乾, 高橋, “聞こえるAM変調実験セットのための教育シナリオ設計,” 電子情報通信学会, 技術報告, 116(256), pp.15-20, December, 2016.
- 2) 福井, 乾, 山田, 高橋, “体感型教材を用いたアクティブラーニング”, 第44回関西合同音声ゼミ, A-17, December, 2016.
- 3) 福井, 乾, 山田, 高橋, “体感型教材を用いた授業シナリオ設計”, 第19回日本音響学会関西支部若手研究者交流研究発表会, no.14, December, 2016.
- 4) 福井, 乾, 高橋, “聞こえるAM変調実験セットの開発～体感型教材を目指して～”, E-101, 情報処理学会関西支部支部大会 2016年, September, 2016.
- 5) 乾, 福井, 山田, 高橋, “可聴域AM通信実験アプリケーション”, 第44回関西合同音声ゼミ, B-17, December, 2016.
- 6) 乾, 福井, 山田, 高橋, “聞こえるAM通信実験キットの実装”, 第19回日本音響学会関西支部若手研究者交流研究発表会, no.10, December, 2016.
- 7) 平松, 通信方式, コロナ社, 1985.
- 8) 斉藤, デジタル無線通信の変復調, 電子情報通信学会, 1996.
- 9) IEEE, Programs for Digital Signal Processing, IEEE Press, New York, 1979.
- 10) B.C.Jムーア, 大串健吾(訳), 聴覚心理学概論, 1994.
- 11) 古井, デジタル音声処理 (デジタルテクノロジーシリーズ(6)), 東海大学出版会, p.14, 1985.
- 12) 伊藤, 他, JNAS: Japanese speech corpus for large vocabulary continuous speech recognition research, ASJ(E), 20(3), pp.199-206, 1999.